

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физика»

ФИЗИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов всех специальностей и направлений подготовки
очной и заочной форм обучения*

ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ПОСТОЯННЫЙ ТОК



Могилев 2020

УДК 535
ББК 22.31
Ф55

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физика» «25» марта 2020 г., протокол № 7

Составители: канд. физ.-мат. наук, доц. О. Е. Коваленко;
канд. физ.-мат. наук, доц. А. И. Ляпин;
ст. преподаватель Е. В. Пивоварова;
д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Хомченко

Рецензент канд. техн. наук, доц. Б. Б. Скарыно

В методических рекомендациях излагаются общие сведения об изучаемых явлениях, описание лабораторных установок и принцип их действия, приводятся программы выполнения работ по разделам «Электростатика» и «Постоянный ток» курса «Физика».

Учебно-методическое издание

ФИЗИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2020

Содержание

Правила охраны труда и техники безопасности при выполнении лабораторных работ	4
1 Лабораторная работа № 1. Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры	5
1.1 Общие сведения.....	5
1.2 Описание лабораторной установки для измерений первым способом.....	7
1.3 Описание лабораторной установки для измерений вторым способом.....	9
2 Лабораторная работа № 2. Изучение полупроводниковых и электронно-вакуумных выпрямителей	10
2.1 Общие сведения.....	10
2.2 Описание лабораторной установки.....	13
2.3 Программа работы	14
3 Лабораторная работа № 3. Измерение электродвижущей силы методом компенсации.....	15
3.1 Общие сведения.....	15
3.2 Описание лабораторной установки.....	18
3.3 Программа работы	19
4 Лабораторная работа № 4. Определение емкости конденсатора с помощью электростатического вольтметра.....	20
4.1 Общие сведения.....	20
4.2 Описание лабораторной установки.....	22
4.3 Программа работы	23
5 Лабораторная работа № 5. Изучение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры.....	25
5.1 Общие сведения.....	25
5.2 Описание лабораторной установки.....	27
5.3 Программа работы	28
6 Лабораторная работа № 6. Изучение обобщенного закона Ома в интегральной форме для постоянного тока.....	29
6.1 Общие сведения.....	29
6.2 Описание лабораторной установки и метода измерений	32
6.3 Программа работы	34
Список литературы	36

Правила охраны труда и техники безопасности при выполнении лабораторных работ

Лабораторные работы составлены в соответствии с требованиями следующих государственных стандартов: ГОСТ 12.1.01.9-79 *ССБТ. Электробезопасность. Общие требования*; ГОСТ 12.1.030-81 *ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление*.

Перед выполнением лабораторных работ необходимо изучить инструкцию по технике безопасности при работе на установках в лаборатории и расписаться в журнале учета прохождения студентами инструкции по технике безопасности.

Перед началом выполнения лабораторной работы студенты должны ознакомиться со схемой, уяснить порядок включения и выключения аппаратуры, а также порядок выполнения лабораторной работы. В случае обнаруженных повреждений следует немедленно заявить об этом преподавателю, который проводит занятия.

Запрещается:

- производить соединение проводов, находящихся под напряжением;
- самостоятельно производить ремонт аппаратуры и макетов;
- оставлять без надзора включенные лабораторные установки;
- при отключении сетевого питания выдергивать питающий силовой шнур из розетки за провод (необходимо это делать, держась за вилку);
- класть сумки, а также другие личные вещи на приборы, лабораторные установки, устройства.

При возникновении аварийной ситуации или обнаружении искрения или запаха дыма следует немедленно отключить аппаратуру и сообщить преподавателю. После окончания лабораторной работы все схемы, макеты и аппаратура должны быть отключены от сети питания, рабочее место приведено в порядок.

1 Лабораторная работа № 1. Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры

Цель работы: изучить зависимость сопротивления металлов от температуры и определить термический коэффициент сопротивления.

1.1 Общие сведения

В классической теории электропроводности металлов свободные электроны рассматриваются как электронный газ, подчиняющийся законам идеального газа. Если к участку проводника приложена разность потенциалов, то возникает электрическое поле и на хаотическое движение электронов накладывается их упорядоченное движение, возникает электрический ток. При своем движении электроны сталкиваются с положительными ионами, расположенными в узлах кристаллической решетки, и теряют приобретенную энергию. То есть ионы препятствуют упорядоченному движению электронов (протеканию электрического тока). Этим объясняется существование электрического сопротивления проводников. При нагревании проводника тепловое движение ионов становится более интенсивным, число столкновений электронов увеличивается и электрическое сопротивление растет.

Зависимость сопротивления проводника от температуры приближенно выражается формулой

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (1.1)$$

где R_t – сопротивление проводника при t °С;

R_0 – сопротивление проводника при 0 °С;

α – температурный коэффициент сопротивления.

Температурным коэффициентом сопротивления называется отношение изменения сопротивления проводника при его нагревании на 1 °С к сопротивлению проводника при 0 °С.

Строго говоря, величина α зависит от температуры. Поэтому из уравнения (1.1) можно определить лишь среднее значение α в температурном интервале от 0 до t °С. Для чистых металлов R изменяется незначительно, поэтому в интервале температур 0...100 °С значение α можно считать постоянным.

Формулу для температурного коэффициента сопротивления можно получить из формулы (1.1), записав ее для двух значений температур R_{t1} и R_{t2} :

$$R_{t1} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_1) \quad \text{и} \quad R_{t2} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_2).$$

Поделив почленно левые и правые части этих равенств, получим

$$\frac{R_{t1}}{R_{t2}} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2},$$

или

$$\alpha = \frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{R_{t_1} t_2 - R_{t_2} t_1}. \quad (1.2)$$

Таким образом, для определения α необходимо измерить сопротивление проводника при различных температурах.

Для измерения сопротивления используются различные способы, в данной работе – два способа.

В первом способе сопротивление измеряется с помощью моста Уитстона, который состоит из реохорда AB , чувствительного гальванометра G и двух сопротивлений – известного R и неизвестного R_x (рисунок 1.1).

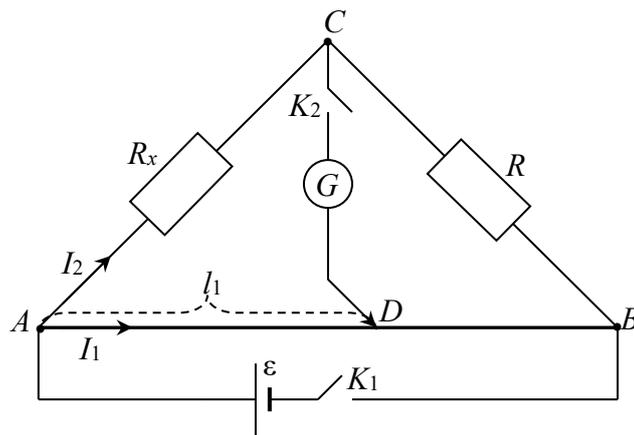


Рисунок 1.1 – Схема моста Уитстона

Величина R подбирается на магазине сопротивлений, и ее можно изменять в широких пределах. Реохорд представляет собой укрепленную на линейке однородную проволоку, вдоль которой может перемещаться скользящий контакт (ползунок) D .

Сначала рассмотрим схему при разомкнутом ключе K_2 .

При замыкании ключа K_1 по проволоке AB потечет ток I_1 и вдоль нее возникнет равномерное падение потенциала от значения φ_A (в точке A) до значения φ_B (в точке B). В цепи ACB пойдет ток I_2 и возникнет падение потенциала от φ_A до φ_C (на сопротивлении R_x) и от φ_C до φ_B (на сопротивление R). Очевидно, что потенциал в точке C имеет промежуточное значение φ_C между значениями φ_A и φ_B ($\varphi_A > \varphi_C > \varphi_B$). Поэтому на участке AB всегда можно найти точку D , потенциал φ_D которой равен потенциалу φ_C в точке C ($\varphi_D = \varphi_C$).

Если при этом условии между точками C и D включить гальванометр (замкнуть ключ K_2), то ток через него не пойдет, т. к. $\varphi_C - \varphi_D = 0$. Такое положение называется равновесием моста.

Для уравновешенного моста на основании закона Ома можно записать следующие соотношения для участков AC , AD и CB , DB соответственно:

$$I_2 \cdot R_x = I_1 \cdot r_{AD}; \quad (1.3)$$

$$I_2 \cdot R = I_1 \cdot r_{DB}. \quad (1.4)$$

Разделив почленно (1.3) на (1.4), получим

$$(R_x / R) = (r_{AD} / r_{DB}). \quad (1.5)$$

Так как сопротивления участков AD и DB пропорциональны их длинам l_1 и l_2 соответственно, то можно записать, что

$$(r_{AD} / r_{DB}) = (l_1 / l_2). \quad (1.6)$$

Подставив (1.6) в (1.5) и выразив R_x , получим

$$R_x = R \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (1.7)$$

Если длина реохорда l , то $l_2 = l - l_1$. Тогда окончательно получим

$$R_x = R \cdot \frac{l_1}{l - l_1}. \quad (1.8)$$

Так как сопротивление реохорда невелико, то мост Уитстона данного типа применяется для измерения небольших сопротивлений.

1.2 Описание лабораторной установки для измерений первым способом

На рисунке 1.2 показан внешний вид лабораторной установки.

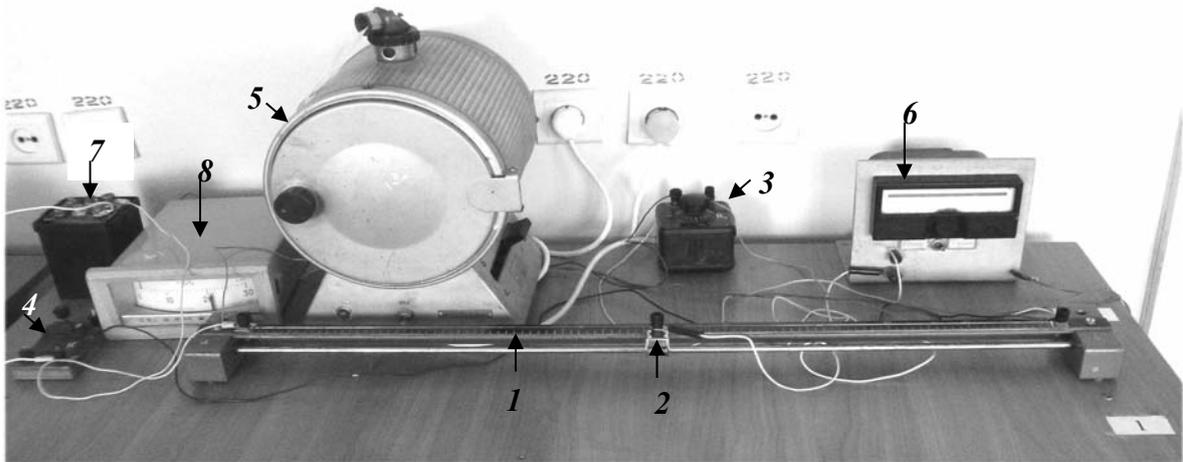


Рисунок 1.2 – Внешний вид лабораторной установки

Исследуемый проводник помещен в нагревательную печь 5 и подключен в одно из плеч моста Уитстона, собранного на реохорде 1. В нижней части печи справа находится регулятор скорости нагрева. Для измерения температуры используется термопара, помещенная внутри печи и подключенная к измерительному прибору 8. В качестве индикатора нуля (G) используется высокочувствительный прибор 6 типа М136/1. На переднем щитке прибора находится переключатель чувствительности («грубо» – «точно»), который при первоначальном включении схемы устанавливается в положение «грубо». Известное сопро-

тивление R выбирается на магазине 3. Источник питания 7 подключается к мосту Уитстона сдвоенным ключом 4. Уравновешивание моста производится перемещением ползунка 2 реохорда.

1.2.1 Программа работы.

1 Собрать схему, изображенную на рисунке 1.1. Цепь включать только после ее проверки лаборантом или преподавателем.

2 На магазине сопротивлений установить сопротивление R в пределах 40...80 Ом (указывается преподавателем).

3 Включить в сеть осветительную систему прибора М136/1. Замкнуть ключи K_1 и K_2 и, перемещая ползунок реохорда, добиться установления риски светового «зайчика» против отметки «0». Установить переключатель прибора в положение «точно» и, уточнив положение ползунка реохорда, определить l_1 . Полученное значение занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений l_1 и вычислений R_x и α

$t, ^\circ\text{C}$	l_1 , число дел.	R_x , Ом	α_2 , град $^{-1}$	$\alpha_{сп}$, град $^{-1}$	$\alpha_{таб}$, град $^{-1}$
20					
30					
40					
50					
60					
70					

4 Включить печь и измерить, как указано в п. 3, значения l_1 через каждые 10° в интервале температур 20...70 °С.

5 По формуле (1.8) вычислить значения R_x .

6 Вычислить по формуле (1.2) температурный коэффициент сопротивления α_2 .

7 Построить график зависимости сопротивления проводника R_x от температуры, откладывая по оси X значения температуры t °С, а по оси Y – значения R_x .

8 По графику определить значения R_0 . Для этого продолжить полученную линию графика до пересечения с осью R_x . Точка пересечения даст значение R_0 . Используя полученное значение R_0 и любое выбранное значение R_t , вычислить $\alpha_{сп}$ по формуле

$$\alpha_{сп} = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot t}.$$

Полученное $\alpha_{сп}$ сравнить с табличным $\alpha_{таб}$.

1.3 Описание лабораторной установки для измерений вторым способом

На рисунке 1.3 показан внешний вид лабораторной установки. Установка состоит из термощафа 1, образца 2 и измерительных приборов 3 и 4 (мультиметров). Изучаемый образец нагревается в термощафу, и с помощью мультиметров измеряются его сопротивление и температура.



Рисунок 1.3 – Внешний вид установки

1.3.1 Программа работы.

1 При необходимости открыть термощаф и установить образец. Подключить к образцу мультиметры: один для измерения сопротивления образца, другой для измерения температуры. Закрыть термощаф. На мультиметрах установить необходимые пределы измерения.

2 Подключить термощаф к однофазной электрической сети 220 В, 50 Гц.

3 Регулятор мощности термощафа установить в среднее положение.

Внимание! Не нагревать образец выше 150 °С.

4 Снять значения сопротивления R_z через каждые 10° в интервале температур 20...130 °С. Полученные значения занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты измерений

$t, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
$R_z, \text{Ом}$												
$R_t, \text{Ом}$												

5 По окончании измерений перевести регулятор мощности термощафа в исходное положение (повернуть регулятор против часовой стрелки до упора). Отключить термощаф от питающей сети.

6 По известным среднему радиусу катушки r , числу витков n , сечению S проводника и его удельному сопротивлению ρ вычислить сопротивление проводника при $t = 20 ^\circ\text{C}$:

$$R_{20} = \rho \cdot L / S,$$

где $L = 2\pi \cdot r \cdot n$;

$r = 20$ мм;

$n = 2000$;

$S = 0,35$ мм²;

$\rho = 0,017$ Ом · мм²/м.

7 Вычислить сопротивление R_t проводника при значениях температуры t , приведенных в таблице 1.2:

$$R_t = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (t - 20)),$$

где $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Полученные значения занести в таблицу 1.2.

8 По данным таблицы 1.2 в одной системе координат построить графики зависимости сопротивления проводника R_0 и R_t от температуры, откладывая по оси X значения температуры t °С, а по оси Y – значения R_0 и R_t . Сравнить полученные графики, сделать вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Объяснить механизм проводимости в металлах.
- 2 От каких факторов зависит сопротивление проводника?
- 3 Почему сопротивление металлов увеличивается с возрастанием температуры?
- 4 Что называется температурным коэффициентом сопротивления?
- 5 Какие основные законы используются в работе?
- 6 Где применяется на практике зависимость R от t ?
- 7 Что такое R_0 ? Как эта величина определяется в работе?

2 Лабораторная работа № 2. Изучение полупроводниковых и электронно-вакуумных выпрямителей

Цель работы: изучить физические основы процессов, происходящих при работе схем выпрямления переменного тока на полупроводниковых и электровакуумных диодах, а также приобрести практические навыки осциллографирования физических процессов.

2.1 Общие сведения

Выпрямителем называется устройство для преобразования переменного тока в постоянный. Выпрямители играют большую роль в современной технике, т. к. производство и распределение электрической энергии экономичнее на переменном токе, а многие виды электроустановок, подавляющее большинство радиотехнических устройств, систем связи и вычислительной техники требуют для своего питания постоянный ток. Кроме этого, выпрямители широко ис-

пользуются не только для преобразования вида электрической энергии, но и для преобразования сигнала в измерительных, автоматических и других устройствах.

Основной частью выпрямителя является электрический вентиль – устройство, электропроводность которого зависит от полярности подключения разности потенциалов. Для нормальной работы выпрямителя необходимо, чтобы электропроводность вентиля в одном направлении была на несколько порядков выше электропроводности в обратном направлении. В качестве вентиля в настоящее время наиболее широко используются полупроводниковые диоды.

Область применения вакуумных и газонаполненных электронных приборов сокращается, но они продолжают использоваться в выпрямителях специального назначения. Поэтому в данной работе схемы выпрямителей на вакуумных диодах приведены только для сравнения.

Блок-схема простейшего выпрямителя представлена на рисунке 2.1, *а*. Выпрямительная схема 2 подключается к сети переменного тока через согласующий трансформатор 1. Необходимость в нем отпадает только в тех редких случаях, когда нужно выпрямить сетевое напряжение.

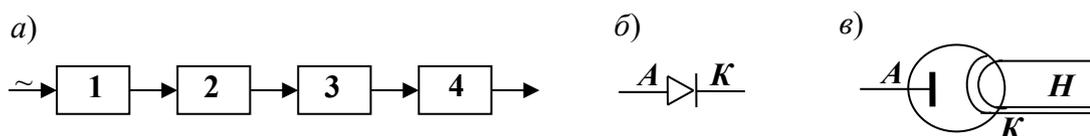


Рисунок 2.1 – Блок-схема выпрямителя переменного тока (*а*), условные графические обозначения полупроводникового (*б*) и вакуумного (*в*) диодов

Выпрямительная схема может состоять из одного полупроводникового или вакуумного диодов (на рисунке 2.1, *б* дано их схематическое изображение).

Перед нагрузкой 4 выпрямителя чаще всего включается сглаживающий фильтр 3 (см. рисунок 2.1, *а*), например конденсатор.

Основной частью полупроводникового диода является *p-n*-переход, электропроводность которого зависит от полярности подключения внешней разности потенциалов. Если к аноду *A* диода подключить (+), а к катоду (–) источника, то электропроводность *p-n*-перехода будет велика и через диод будет протекать «прямой» ток. Такое подключение *p-n*-перехода (диода) называется прямым (или пропускным). При изменении полярности подключения разности потенциалов на противоположное электропроводность *p-n*-перехода резко падает. В этом случае через диод протекает «обратный» ток, который на несколько порядков меньше прямого.

Одна из схем выпрямителей, изучаемых в данной лабораторной работе, приведена на рисунке 2.2.

Первичная обмотка трансформатора *T*₁ включается в сеть переменного тока (в данном случае $U = 220$ В, $\nu = 50$ Гц). Во вторичной обмотке *II* возникает переменное напряжение той же частоты. Если верхний вывод вторичной обмотки трансформатора (см. рисунок 2.2, *а*) в течение первого полупериода

да ($0 < t < T/2$) питающего напряжения имеет положительный потенциал, то в течение второго полупериода ($T/2 < t < T$) он будет иметь отрицательный потенциал. Поэтому ток через диод и нагрузку будет протекать только в течение одного полупериода; такая схема выпрямителя называется однополупериодной. Во второй схеме (см. рисунок 2.2, б) прямой ток неизмеримо меньше.

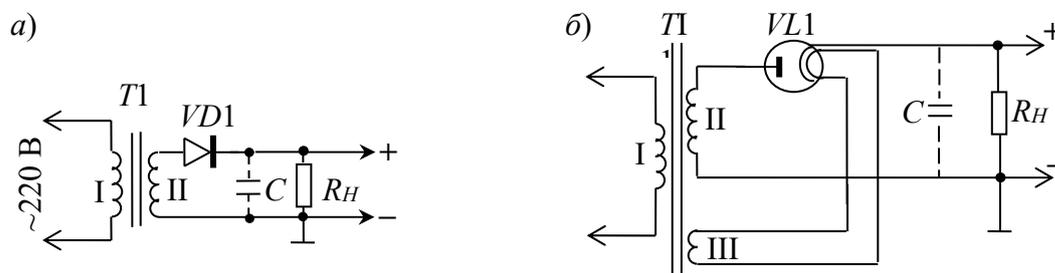


Рисунок 2.2 – Электрические схемы однополупериодных выпрямителей на полупроводниковом и вакуумном диодах

Для получения напряжения, мало изменяющегося в течение периода питающего напряжения, используют сглаживающие фильтры. Простейшим фильтром может служить конденсатор C , подключенный параллельно нагрузке (показан пунктиром на рисунке 2.2). Действие такого фильтра основано на том, что конденсатор C быстро заряжается прямым током через малое сопротивление диодов $VD1$ или $VL1$ и относительно медленно разряжается на сопротивление нагрузки R_H . Чем меньше допустимый уровень пульсаций, тем более сложной и дорогостоящей становится схема сглаживающего фильтра.

Двухполупериодное выпрямление можно получить различными способами. Например, используется вторичная обмотка трансформатора со средней точкой, подключенной к катодам двух диодов (рисунок 2.3).

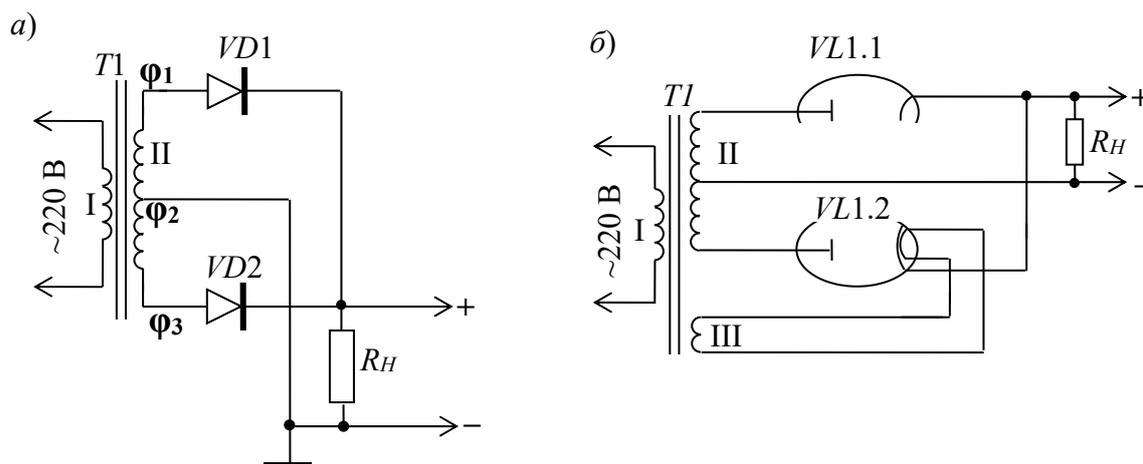


Рисунок 2.3 – Электрические схемы двухполупериодных выпрямителей со средней точкой

Если в течение первого полупериода $\phi_1 > \phi_2 > \phi_3$, то потенциал анода диода $VD1$ выше потенциала его катода и через этот диод течет прямой ток. В это

же время $\varphi_3 < \varphi_2$ и диод $VD2$ заперт. Во втором полупериоде полярность ЭДС вторичной обмотки изменится на противоположное $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$ и положительный потенциал окажется приложенным к аноду диода $VD2$. Прямой ток потечет через нагрузку в прежнем направлении, но уже через $VD2$. Таким образом, половины вторичной обмотки и диоды работают в этой схеме поочередно в течение одного из полупериодов выпрямляемого напряжения.

На рисунке 2.4 показана другая схема двухполупериодного выпрямителя.

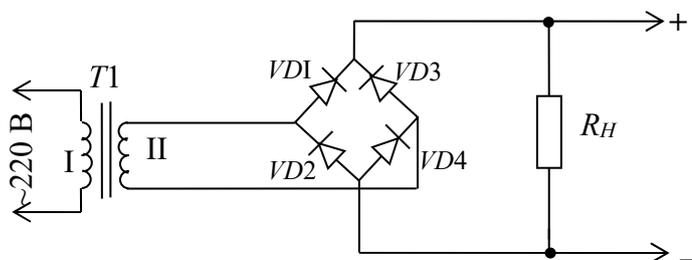


Рисунок 2.4 – Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя на полупроводниковых диодах

Эта схема выпрямителя выполнена на четырех диодах, включенных по мостовой схеме. В одну диагональ моста включена вторичная обмотка трансформатора, а в другую – сопротивление нагрузки. Если в течение первого полупериода выпрямляемого напряжения верхний вывод вторичной обмотки имеет положительный потенциал, то прямой ток протекает через диоды $VD1$ и $VD4$ и нагрузку, диоды $VD2$ и $VD3$ заперты. При смене полярности напряжения во втором полупериоде прямой ток протекает через диоды $VD2$ и $VD3$, а диоды $VD1$ и $VD4$ оказываются запертыми. Преимущества мостовой схемы выпрямления перед схемой со средней точкой: меньшее число витков вторичной обмотки трансформатора, вдвое меньшее обратное напряжение на закрытом диоде, схема может работать без трансформатора. Недостаток этой схемы – большое число диодов, что снижает ее КПД и увеличивает стоимость. Дополнительные сведения о переменном токе, работе полупроводниковых и электровакуумных диодов, а также схем выпрямления даны в [1–4].

2.2 Описание лабораторной установки

На рисунке 2.5 представлен внешний вид лабораторной установки.

Лабораторная установка состоит из трансформатора с двумя вторичными обмотками (одна из них имеет отвод от середины), монтажной панели с четырьмя полупроводниковыми диодами типа Д226Б, конденсатора, нагрузочного резистора, осциллографа и вакуумного двойного диода.

2.3 Программа работы

2.3.1 Снятие осциллограммы переменного напряжения.

2.3.1.1 Нажать кнопки «разв.», «Синхр», «10 Гц» на передней панели осциллографа. Установить ручки \longleftrightarrow , \updownarrow , «частота», «яркость», «фокус» в среднее положение, ручки «усиление Y» и «усиление X» – в крайнее левое положение. Включить осциллограф в сеть и дать ему прогреться в течение 2...3 мин. Установить светящуюся точку в центр экрана, а затем ручкой «усиление X» установить длину горизонтальной линии, равную размеру координатной сетки на экране. В случае необходимости отрегулировать фокусировку и яркость.

2.3.1.2 Подключить «вход Y» к одной из вторичных обмоток трансформатора. Включить трансформатор в сеть. Ручкой «усиление Y» установить «размах» кривой, не превышающий размер координатной сетки. Ручкой «частота» добиться устойчивого изображения двух-трех периодов переменного тока на экране осциллографа. Зарисовать осциллограмму и выключить трансформатор.

2.3.2 Снятие осциллограммы напряжения, выпрямленного однополупериодным выпрямителем.

2.3.2.1 Собрать схему, изображенную на рисунке 2.2, а, не подключая конденсатор С. Вход осциллографа подключить к нагрузке R_H .

2.3.2.2 После проверки схемы лаборантом или преподавателем включить трансформатор в сеть, зарисовать осциллограммы выпрямленного напряжения.

2.3.2.3 Подключить конденсатор С и повторить п. 2.3.2.2.

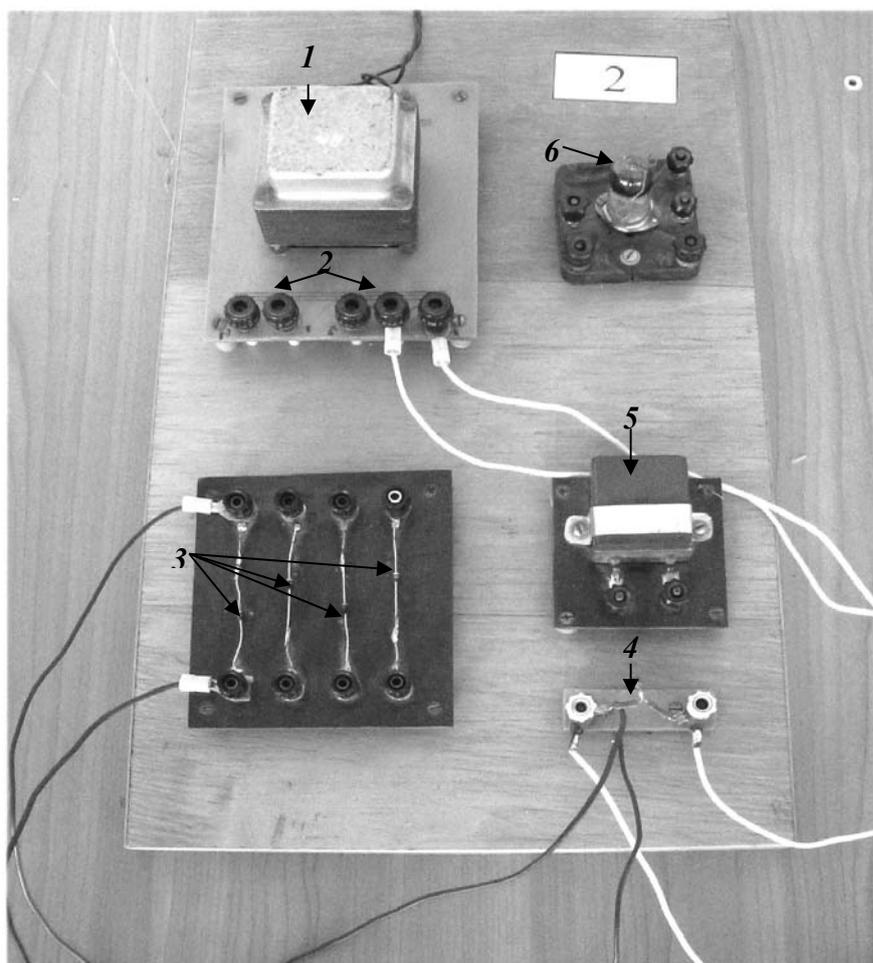
2.3.3 Снятие осциллограммы напряжения, выпрямленного двухполупериодным выпрямителем.

2.3.3.1 Собрать схему, изображенную на рисунке 2.3, а, и повторить пп. 2.3.2.2 и 2.3.2.3.

2.3.3.2 Собрать схему, изображенную на рисунке 2.4, и повторить пп. 2.3.2.2 и 2.3.2.3.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое выпрямитель и какова его роль в современной технике?
- 2 Нарисуйте и поясните блок-схему выпрямителя. Без каких элементов выпрямитель может в некоторых случаях выполнять свои функции?
- 3 Каким свойством должны обладать электрические вентили, используемые в выпрямителе?
- 4 В чем состоит явление термоэлектронной эмиссии?
- 5 Объясните принцип действия однополупериодной схемы выпрямления. Почему она так называется?
- 6 В чем преимущества двухполупериодного выпрямителя? Как он работает?
- 7 На чем основано действие простейшего сглаживающего фильтра? Чем вызвана необходимость использования фильтров?
- 8 Объясните работу мостовой схемы выпрямителя.
- 9 Дайте сравнительный анализ достоинств и недостатков изученных схем двухполупериодного выпрямления.



1 – трансформатор; 2 – выводы обмоток трансформатора; 3 – набор полупроводниковых диодов; 4 – сопротивление нагрузки; 5 – сглаживающий фильтр (конденсатор); 6 – вакуумный диод

Рисунок 2.5 – Внешний вид лабораторной установки

3 Лабораторная работа № 3. Измерение электродвижущей силы методом компенсации

Цель работы: изучить метод компенсации и экспериментально измерить ЭДС гальванических элементов.

3.1 Общие сведения

Одним из условий возникновения упорядоченного движения электрических зарядов в проводнике является наличие в нём электрического поля, способного перемещать заряды.

Потенциальные силы электростатического поля не могут поддерживать постоянный ток в цепи, т. к. протекание тока неизбежно приводит к выравниванию потенциалов между заряженными проводниками. Для поддержания электрического тока в цепи необходимо наличие источника энергии (источника

тока) неэлектростатической природы. Основной величиной, характеризующей такой источник тока, является его электродвижущая сила (ЭДС).

Электродвижущей силой называют физическую величину, численно равную работе сторонних (не потенциальных) сил по перемещению положительного единичного заряда на отдельном участке или по всей цепи.

Сторонние силы приводят в движение заряженные частицы внутри генераторов, гальванических элементов, аккумуляторов и других источников. Природа сторонних сил может быть различной: в генераторах – это силы со стороны вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля, или сила Лоренца, действующая со стороны магнитного поля на электроны в движущемся проводнике; в гальванических элементах – это силы, возникающие за счёт энергии химических реакций между электродами и электролитами.

По закону Ома для полной цепи сила тока

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (3.1)$$

откуда для ЭДС получим

$$\varepsilon = IR + Ir, \quad (3.2)$$

где IR – напряжение на внешнем участке цепи (на нагрузке);

Ir – напряжение на внутреннем участке цепи (на электролите).

При подключении вольтметра к клеммам источника тока он показывает напряжение U на внешнем участке цепи:

$$U = \varepsilon - Ir. \quad (3.3)$$

Из формулы (3.3) видно, что напряжение U , измеряемое вольтметром, может быть равно ЭДС только в том случае, если $r = 0$ или $I = 0$. Однако внутреннее сопротивление источника тока всегда отлично от нуля ($r \neq 0$). Следовательно, в момент измерения ЭДС с помощью вольтметра ток через элемент должен быть равен нулю ($I r = 0$). Но в этом случае и вольтметр ничего не покажет. Поэтому ЭДС источников тока измеряют не вольтметрами, а методом компенсации.

Сущность метода компенсации при измерении ЭДС заключается в подборе на участке электрической цепи такого напряжения, которое равно ЭДС исследуемого источника тока. Ниже поясняется метод компенсации.

Схема электрической цепи для определения ЭДС методом компенсации изображена на рисунке 3.1.

При замыкании ключа K_1 по проволоке AB потечет ток I_1 , и вдоль нее возникнет равномерное падение потенциала от значения φ_A (в точке A) до значения φ_B (в точке B). Если теперь замкнуть ключ K_2 и ключом K_3 подключить источник ε_X , то в цепи $A-\varepsilon_X-R-G-D$ пойдет ток I_2 . В этой цепи действуют ЭДС источника ε_X и напряжение $U_{AD} = \varphi_A - \varphi_D$ на участке AD , обусловленное током I_1 . Поэтому ток I_2 определяется законом Ома в интегральной форме для неоднородной цепи:

$$I_2 = \frac{U_{AD} - \varepsilon_X}{r_X + R + r_G}, \quad (3.4)$$

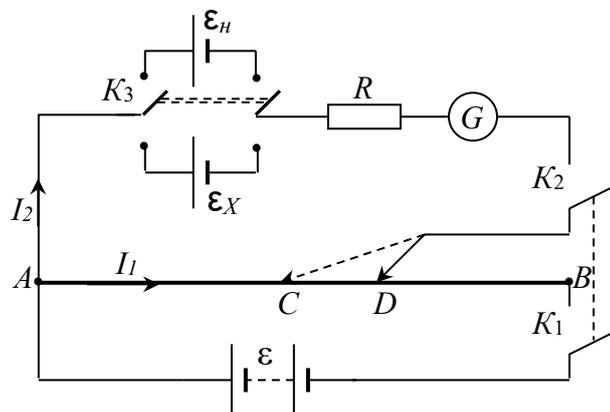
где r_X – внутреннее сопротивление гальванического элемента с неизвестной ЭДС;

r_G – сопротивление гальванометра G ;

R – ограничительное сопротивление.

В формуле (3.4) величина ε_X взята со знаком $(-)$, т. к. источники ε_X и ε включены навстречу друг другу и ЭДС источника ε_X препятствует протеканию тока I_2 . Из формулы видно, что в зависимости от соотношения величин U_{AD} и ε_X ток I_2 может протекать в одном и в другом направлениях.

Значение U_{AD} зависит от положения ползунка реохорда. Поэтому, перемещая ползунок реохорда, можно добиться совпадения значений U_{AD} и ε_X , т. е. компенсации ε_X . В этом случае ток I_2 будет равен нулю, и при замкнутых ключах K_1 , K_2 и K_3 стрелка гальванометра установится на нуле.



G – нуль-гальванометр; AB – реохорд с подвижным контактом D (ползунком); ε_X – исследуемый элемент; ε_n – нормальный элемент Вестона

Рисунок 3.1 – Схема лабораторной установки

Равенство $U_{AD} = \varepsilon_X$ может быть достигнуто лишь при условии, когда величина ЭДС основного источника ε будет больше ЭДС исследуемого источника ε_X . В противном случае максимальное напряжение на реохорде U_{AB} будет меньше ε_X и компенсация не будет достигнута.

Получим формулу для определения ЭДС методом компенсации.

Напряжение на участке AD реохорда определяется сопротивлением R_{AD} и значением силы тока I_1 , текущего по этому участку:

$$U_{AD} = I_1 \cdot R_{AD}. \quad (3.5)$$

Поэтому при $U_{AD} = \varepsilon_X$, $I_2 = 0$ из формулы (3.5) следует, что

$$I_1 \cdot R_{AD} = \varepsilon_X. \quad (3.6)$$

Это значит, что напряжение U_{AD} на участке AD компенсирует ЭДС исследуемого элемента ε_X .

Заменив исследуемый элемент эталонным ε_n (с известной ЭДС) и перемещая ползунок реохорда, можно найти новое значение напряжения U_{AC} на участке AC , которое будет компенсировать ε_n . В этом случае условие компенсации будет иметь вид:

$$I_1 \cdot R_{AC} = \varepsilon_n. \quad (3.7)$$

Сила тока на участке AB остаётся прежней, т. к. в ветви AGC тока нет. Разделив почленно (3.6) на (3.7), получим

$$\varepsilon_X = \varepsilon_n \cdot \frac{R_{AD}}{R_{AC}}. \quad (3.8)$$

Для калиброванной проволоки реохорда сопротивление участков AD и AC пропорционально их длинам. Поэтому

$$\frac{R_{AD}}{R_{AC}} = \frac{l_1}{l_2}, \quad (3.9)$$

где l_1 и l_2 – длины участков AD и AC в делениях линейки реохорда.

Подставив (3.9) в (3.8), получим искомую формулу для ε_X :

$$\varepsilon_X = \varepsilon_n \cdot \frac{l_1}{l_2}. \quad (3.10)$$

Таким образом, зная значение ε_n и измерив $AD = l_1$ и $AC = l_2$, по формуле (3.10) можно найти искомую величину ε_X .

3.2 Описание лабораторной установки

На рисунке 3.2 показан внешний вид лабораторной установки.

Проволока реохорда AB натянута на масштабную линейку (позиция 1), что позволяет непосредственно отсчитывать длины l_1 и l_2 . Ключи K_1 и K_2 объединены (позиция 7), поэтому возможно одновременно замыкать и размыкать обе цепи на короткое время во избежание быстрого разряда батареи ε (позиция 3) и поляризации элементов ε_X (позиция 8), ε_n (позиция 9). С этой же целью защиты элемента и гальванометра от сильных токов в момент измерения последовательно с гальванометром (позиция 6) включено ограничивающее сопротивление R (позиция 5). Исследуемый ε_X и нормальный ε_n элементы включаются в цепь с помощью ключа K_3 (позиция 4). Компенсация достигается перемещением ползунка реохорда (позиция 2).

В работе применяется высокочувствительный гальванометр с нулевой отметкой, находящейся посередине шкалы. В качестве эталонного источника ЭДС используется нормальный ртутно-кадмиевый элемент Вестона. ЭДС нормаль-

ного элемента малочувствительна к изменениям температуры и очень мало изменяется со временем, т. к. мала поляризация.

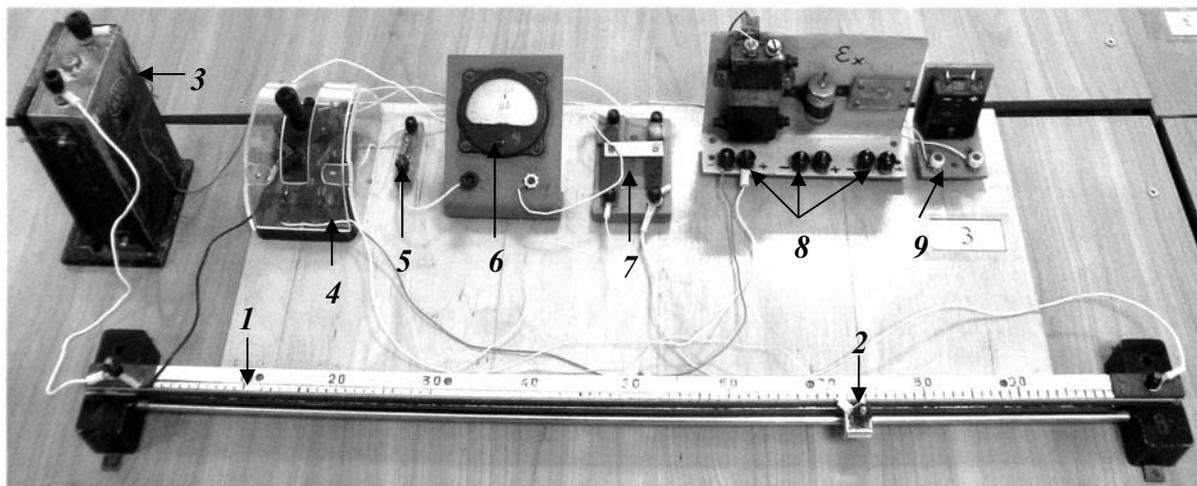


Рисунок 3.2 – Внешний вид лабораторной установки

При $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\varepsilon_n = 1,0183\text{ В}$. Ввиду постоянства ЭДС нормальный элемент удобно использовать в качестве эталона. Сила тока через элемент Вестона не должна превышать $10^{-6} \dots 10^{-5}\text{ А}$. Этот элемент применяется исключительно в компенсационных схемах.

3.3 Программа работы

3.3.1 Ознакомиться с приборами и собрать цепь по схеме (см. рисунок 3.1).

Убедиться, что исследуемый элемент и аккумулятор подключены одноимёнными полюсами к точке A реохорда. До проверки схемы лаборантом или преподавателем ключи не замыкать.

3.3.2 Расположить ползунок реохорда примерно на середине линейки и с помощью переключателя K_3 включить в цепь испытуемый элемент ε_{x1} .

3.3.3 Замкнуть на короткое время цепь сдвоенным ключом K_1-K_2 и, передвигая ползунок реохорда, найти такое его положение, при котором стрелка гальванометра устанавливается на нуль.

3.3.4 Измерить длину плеча l_1 реохорда между точками A и D . На линейке реохорда одно деление не равно 1 см, поэтому отсчёт следует вести в делениях. Опыт повторить 4–5 раз и найти среднее значение $\langle l_1 \rangle$.

3.3.5 С помощью переключателя K_3 включить в цепь нормальный элемент ε_n и, следуя пп. 3.3.3 и 3.3.4, определить длину плеча $\langle l_2 \rangle$ реохорда.

3.3.6 Вычислить ЭДС исследуемого элемента ε_{x1} по формуле (3.10).

3.3.7 Повторить пп. 3.3.2–3.3.6 для элементов ε_{x2} и ε_{x3} .

3.3.8 Все измеренные и вычисленные значения величин занести в таблицу 3.1, продолжив её ещё для двух неизвестных элементов.

Таблица 3.1 – Результаты измерений электродвижущей силы гальванических элементов

Номер элемента	I_1 , дел.	I_2 , дел.	$\langle I_1 \rangle$, дел.	$\langle I_2 \rangle$, дел.	ε_n , В	ε_{X1} , В

Контрольные вопросы

- 1 Что такое ЭДС?
- 2 Какова природа сторонних сил в источниках тока?
- 3 Можно ли измерить ЭДС с помощью вольтметра?
- 4 В чём заключается метод компенсации?
- 5 Запишите и поясните закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме.
- 6 Выведите формулу для нахождения ε_X .
- 7 Можно ли измерить ε_X , если $\varepsilon_X > \varepsilon$?

4 Лабораторная работа № 4. Определение емкости конденсатора с помощью электростатического вольтметра

Цель работы: экспериментально определить электрические емкости конденсаторов и проверить законы их параллельного и последовательного соединения.

4.1 Общие сведения

Конденсатором называется система двух близкорасположенных проводников. При этом проводники имеют такие формы, что при сообщении им равных по значению, но противоположных по знаку зарядов, поле, создаваемое этой системой, сосредоточено в области пространства, ограниченной проводниками. Эти проводники называются обкладками (или пластинами) конденсатора.

Электрической емкостью называется физическая величина, равная отношению заряда Q , накопленного в конденсаторе и разности потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) между его обкладками:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U}. \quad (4.1)$$

Из формулы (4.1) следует физический смысл величины: *электрическая емкость численно равна заряду, который нужно сообщить конденсатору, чтобы его разность потенциалов увеличить на 1 В.*

Емкость плоского конденсатора определяется площадью его обкладок и величиной зазора между ними, а также диэлектрической проницаемостью среды между обкладками.

Один из способов определения емкости конденсатора основан на законе сохранения электрического заряда: *алгебраическая сумма зарядов электрически изолированной системы не изменяется со временем.*

Рассматривая конденсатор как изолированную систему, получим формулу для определения его емкости.

Эталонный конденсатор с известной емкостью C_0 зарядим до разности потенциалов U_0 (рисунок 4.1). Затем, отключив его от источника напряжения, быстро подключим к нему параллельно конденсатор неизвестной емкости C_x . Тогда первоначальный заряд Q_0 эталонного конденсатора распределится между обоими конденсаторами и разность потенциалов между обкладками конденсаторов станет равной U_1 . Пренебрегая потерями в момент соединения конденсаторов, закон сохранения заряда можно записать в виде

$$Q_0 = Q_1 + Q_2, \quad (4.2)$$

где Q_1 – заряд, оставшийся на эталонном конденсаторе C_0 после подключения к нему конденсатора C_x ;

Q_2 – заряд, перешедший на конденсатор C_x .

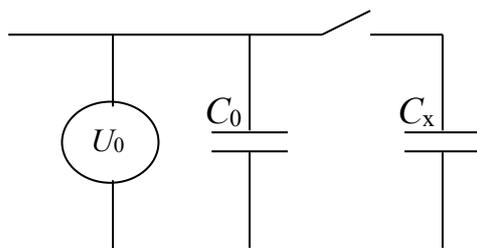


Рисунок 4.1 – Пояснение сущности метода измерения ёмкости

Выразим заряды в формуле (4.2) через емкости и разности потенциалов с помощью формулы (4.1):

$$Q_0 = C_0 U_0; \quad Q_1 = C_0 U_1; \quad Q_2 = C_x U_1.$$

Подставив их в формулу (4.2), получим

$$C_0 U_0 = C_0 U_1 + C_x U_1. \quad (4.3)$$

Из (4.3) выразим емкость неизвестного конденсатора и получим расчетную формулу

$$C_x = \frac{C_0(U_0 - U_1)}{U_1}. \quad (4.4)$$

4.2 Описание лабораторной установки

Разность потенциалов между обкладками конденсаторов измеряется с помощью электростатического вольтметра. Измерительный механизм электростатического вольтметра состоит из подвижного и неподвижного электродов, изолированных друг от друга. Поэтому при измерениях постоянного напряжения ток через вольтметр не протекает. Так как емкость вольтметра по сравнению с емкостями, используемыми в работе, ничтожно мала, то погрешностью, вносимой вольтметром, можно пренебречь. На рисунке 4.2 показана электрическая схема установки. На рисунке 4.3 представлен внешний вид лабораторной установки.

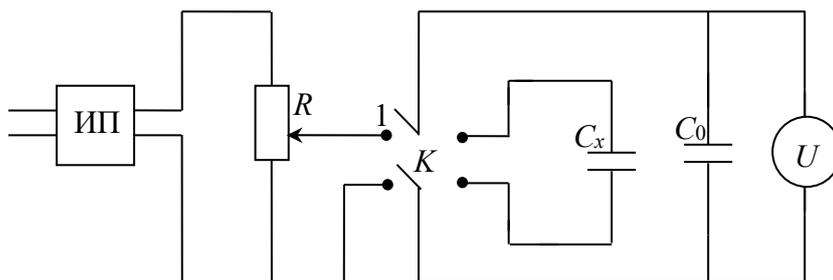
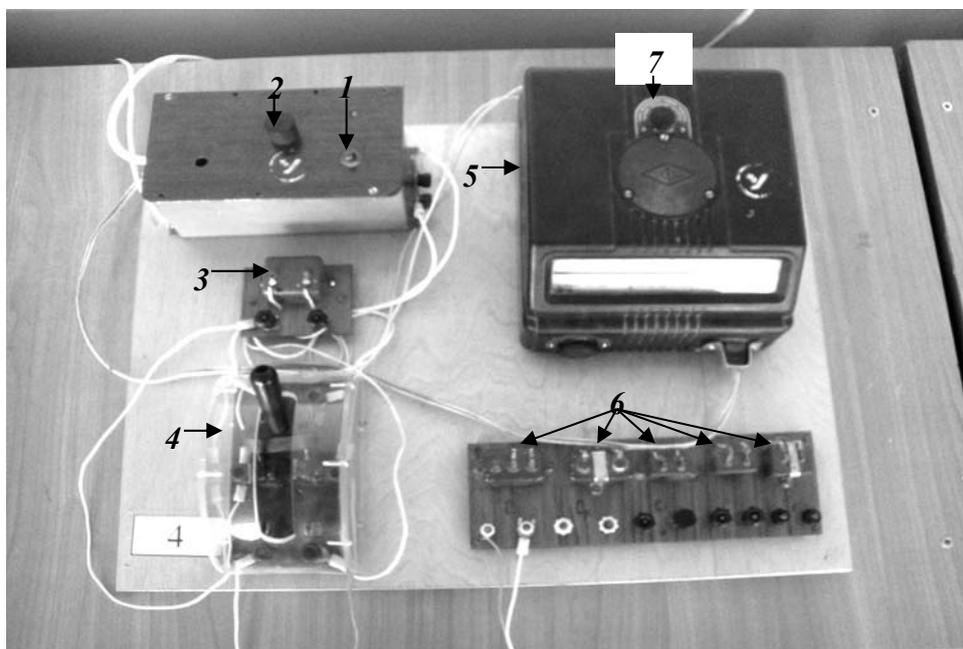


Рисунок 4.2 – Схема лабораторной установки



1 – тумблер источника питания; 2 – потенциометр R ; 3 – эталонный конденсатор; 4 – ключ K ; 5 – электростатический вольтметр; 6 – набор исследуемых конденсаторов; 7 – корректор

Рисунок 4.3 – Внешний вид лабораторной установки

4.3 Программа работы

Ознакомиться с приборами и собрать схему согласно рисунку 4.2. Номера исследуемых конденсаторов выбираются по указанию преподавателя. До проверки собранной цепи преподавателем или лаборантом источник питания не включать.

Включить освещение шкалы вольтметра. Проверить, находится ли «световой зайчик» на нуле. Если нет, то вместе с лаборантом или преподавателем установить его корректором на нулевую отметку шкалы.

4.3.1 Определение емкости конденсаторов.

4.3.1.1 Рукоятку потенциометра поставить в левое крайнее положение. Закрыть ключ K на источник (на рисунке 4.2 положение от себя).

4.3.1.2 Включить выпрямитель в сеть и с помощью потенциометра R увеличить напряжение на эталонном конденсаторе до 90 В. Снять показания вольтметра U_0 .

4.3.1.3 Перевести ключ K в противоположное положение, тем самым отключив конденсатор C_0 от источника питания и подключив его к конденсатору с неизвестной емкостью C_x . Снять показания вольтметра U_1 .

4.3.1.4 Измерения проделать не менее трех раз, подавая различные напряжения (90, 100, 110 В) на эталонный конденсатор. При этом после каждого измерения конденсатор неизвестной емкости обязательно разряжать. Показания вольтметра занести в таблицу 4.1, которую продолжить для двух других конденсаторов.

4.3.1.5 По формуле (4.4) подсчитать емкость C_x . Найти среднее значение $\langle C_x \rangle$.

Таблица 4.1 – Результаты измерения емкости отдельных конденсаторов

Номер конденсатора	Номер измерения	U_0 , В	U_1 , В	C_x , мкФ	$\langle C_x \rangle$, мкФ

4.3.2 Определение емкости батареи параллельно соединенных конденсаторов.

4.3.2.1 Соединить два любых из заданных конденсаторов параллельно (рисунок 4.4, а).

Определить емкость батареи так, как указано в пп. 4.3.1.2–4.3.1.5. Сравнить полученный результат с емкостью батареи, вычисленной по формуле

$$C'_{\text{бат}} = C_{1X} + C_{2X}.$$

4.3.2.2 Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.2.

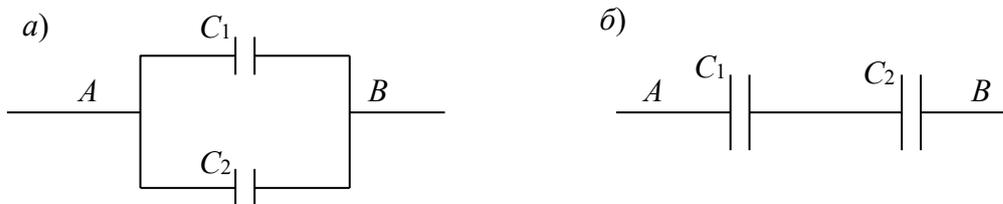


Рисунок 4.4 – Схемы параллельного и последовательного соединения конденсаторов

Таблица 4.2 – Результаты измерений емкости параллельно соединенных конденсаторов

Номер конденсатора	Номер измерения	U_0 , В	U_1 , В	$C_{БАТ}$, мкФ	$\langle C_{БАТ} \rangle$, мкФ	$C'_{БАТ}$, мкФ

4.3.3 Определение емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов.

4.3.3.1 Соединить два любых из заданных конденсаторов последовательно (см. рисунок 4.4, б). Определить емкость батареи так, как указано в пп. 4.3.1.2–4.3.1.5. Сравнить полученный результат с емкостью батареи, вычисленной по формуле

$$\frac{1}{C'_{БАТ}} = \frac{1}{C_{1X}} + \frac{1}{C_{2X}}.$$

4.3.3.2 Соединить три конденсатора последовательно и определить емкость батареи. Сравнить полученный результат с емкостью батареи, вычисленной по формуле

$$\frac{1}{C'_{БАТ}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_{ix}}.$$

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу, аналогичную таблице 4.2.

Контрольные вопросы

1 Что такое электрическая емкость конденсатора? От чего она зависит и в каких единицах измеряется?

2 В чем заключается сущность метода измерения, использованного в данной лабораторной работе?

3 Какой закон положен в основу вывода рабочей формулы? Вывести рабочую формулу.

4 Какой формулой определяется емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов?

5 Какой формулой определяется емкость батареи последовательно соединенных конденсаторов?

5 Лабораторная работа № 5. Изучение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры

Цель работы: изучить зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры.

5.1 Общие сведения

Существует группа веществ, которые в отличие от большинства диэлектриков (например, слюды, парафина, полистирола, фторопласта и др.) могут обладать спонтанной (самопроизвольной) поляризацией в отсутствие внешнего электрического поля. Это явление было открыто первоначально для сегнетовой соли $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$. В связи с этим подобные вещества получили название сегнетоэлектриков. Первое детальное исследование электрических свойств солей было осуществлено советскими физиками И. В. Курчатовым и П. П. Кобеко. Очень важное практическое значение имеет открытый советским физиком Б. И. Вулом и его сотрудниками сегнетоэлектрик – метатитанат бария (BaTiO_2). Сегнетоэлектриками являются титанат бария BaTiO_3 , дигидрофосфат калия KN_2PO_4 и др.

Вещества, обладавшие сегнетоэлектрическими свойствами, отличаются от остальных диэлектриков рядом характерных особенностей.

Во-первых, если у обычных диэлектриков величина диэлектрической проницаемости ϵ составляет несколько единиц, то у сегнетоэлектриков значение ϵ может достигать около нескольких тысяч. Вещества, обладающие сегнетоэлектрическими свойствами, могут быть использованы в качестве диэлектрика конденсатора. Напомним, что емкость плоского конденсатора определяется формулой

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}. \quad (5.1)$$

Следовательно, при одинаковой площади S обкладок и одинаковом расстоянии d между обкладками, конденсатор с сегнетоэлектриком в качестве диэлектрика будет обладать в тысячи раз большей емкостью или (при данной емкости) существенно меньшими габаритами по сравнению со слюдяными, бумажными и т. п. конденсаторами.

Во-вторых, диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков зависит от температуры. Характер этой зависимости показан на рисунке 5.1, а.

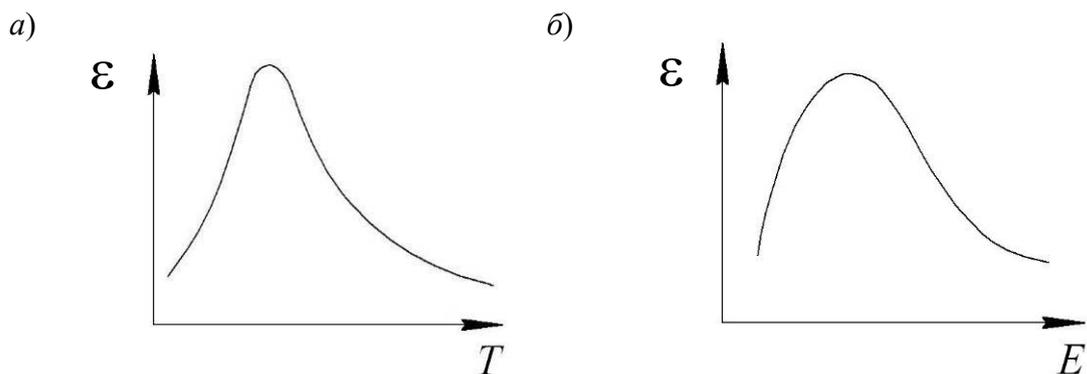


Рисунок 5.1 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры (а) и напряженности электрического поля в веществе (б)

В-третьих, величина ϵ сегнетоэлектриков является функцией напряжённости E поля в веществе: $\epsilon = \epsilon(E)$ (рисунок 5.1, б). В связи с этим зависимость электрического смещения \vec{D} от \vec{E} при не очень больших полях является нелинейной. При достаточно больших значениях \vec{E} происходит насыщение – вектор поляризации \vec{P} перестает изменяться с ростом \vec{E} .

В-четвертых, при изменении направления поля в сегнетоэлектриках значения вектора поляризации \vec{P} , а следовательно, и \vec{D} ($\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$) отстают от напряженности поля \vec{E} , в результате чего \vec{P} и \vec{D} определяются не только величиной \vec{E} в данный момент, но и предшествующими значениями \vec{E} , т. е. имеет место электрический гистерезис (рисунок 5.2).

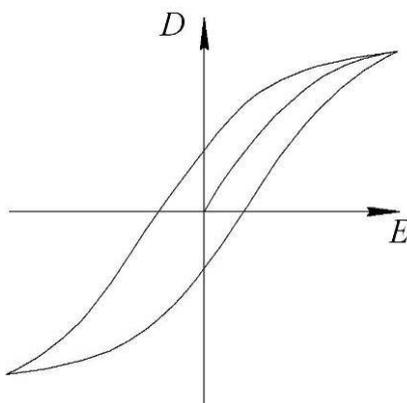


Рисунок 5.2 – Зависимость электрического смещения от напряженности электрического поля в веществе

Основные свойства сегнетоэлектриков (большое значение ϵ , насыщение при сравнительно слабых полях, зависимость от температуры, гистерезисные явления) объясняются спонтанной поляризацией образцов. Кристаллы сегнетоэлектриков состоят из самопроизвольно поляризованных до насыщения областей, называемых доменами. В пределах доменов дипольные моменты молекул спонтанно устанавливаются параллельно друг другу. При отсутствии внешнего поля векторы поляризации доменов ориентированы хаотично, и суммарный

электрический момент образца равен нулю. При наложении электрического поля векторы поляризации доменов ориентируются в направлении поля, и образец приобретает заметный электрический момент даже в сравнительно слабых полях. Под действием внешнего поля момент домена поворачивается как целое, устанавливаясь по направлению поля.

Для каждого сегнетоэлектрика существует температура, выше которой он утрачивает свои свойства и становится обычным диэлектриком. Эта температура Θ носит название точки Кюри. При $T > \Theta$ тепловое движение нарушает спонтанную ориентацию дипольных моментов внутри доменов и сегнетоэлектрические свойства исчезают.

Как уже отмечалось, применение сегнетоэлектриков в качестве диэлектрика конденсатора позволяет создавать конденсаторы малых размеров с достаточно большой емкостью. Зависимость емкости конденсаторов с сегнетоэлектрическим диэлектриком от приложенного напряжения используют при создании конденсаторов с нелинейной характеристикой – варикондов. Вариконды широко применяются в радиотехнике: в стабилизаторах напряжений, в диэлектрических усилителях, в сенсорных блоках телевизоров и т. д.

5.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка конструктивно выполнена в виде двух блоков: электрической печи с помещённым в нее образцом сегнетоэлектрика и измерительного блока (рисунок 5.3).

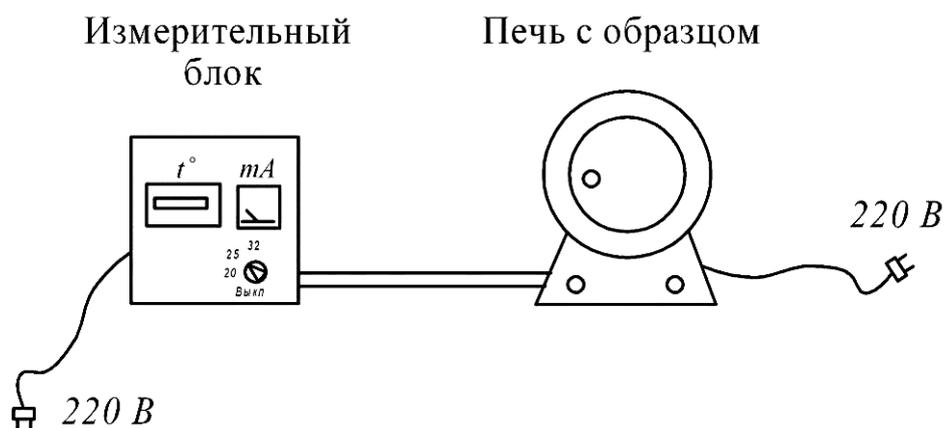


Рисунок 5.3 – Схема лабораторной установки

Образец представляет собой прямоугольную пластину титаната бария с напыленными серебряными пленками. То есть образец вместе с пленками образует плоский конденсатор, в котором диэлектриком является титанат бария. Упрощенная электрическая схема установки показана на рисунке 5.4.

Понижающий трансформатор T_r включается в сеть переменного тока. Со вторичной обмотки трансформатора снимается напряжение $U_0 = 20 \dots 32$ В, которое подается на образец. Микроамперметр с мостиковым выпрямителем служит для измерения тока в цепи. Падение напряжения на микроамперметре пре-

небрежимо мало по сравнению с напряжением U_0 . Температура образца контролируется мультиметром, термопара которого находится в непосредственном контакте с исследуемым образцом.

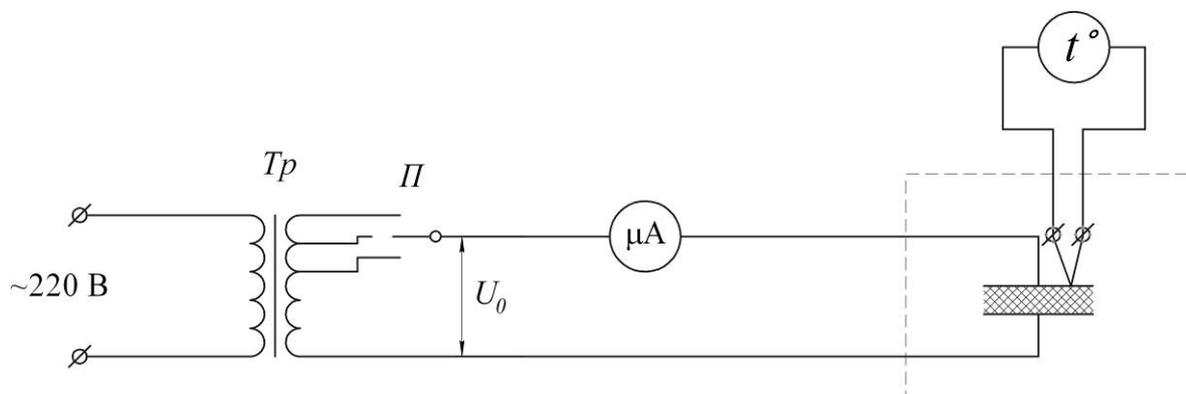


Рисунок 5.4 – Электрическая схема лабораторной установки

Электрическое сопротивление X_c конденсатора емкостью C переменному току с частотой f вычисляется по формуле

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (5.2)$$

Так как сила тока в цепи конденсатора (образца) определяется законом Ома, то с учетом (5.2) получим

$$I = \frac{U_0}{X_c} = U_0 2\pi f C. \quad (5.3)$$

Подставив (5.1) в (5.3), выразим ε . Получим расчетную формулу для диэлектрической проницаемости титаната бария:

$$\varepsilon = \frac{Id}{U_0 2\pi f \varepsilon_0 S}. \quad (5.4)$$

Площадь пленок, нанесенных на поверхность образца, $S = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, его толщина $d = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, частота питающей сети $f = 50 \text{ Гц}$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

5.3 Программа работы

5.3.1 Установить переключателем $П$ одно из значений напряжения (20, 25 или 32 В) по указанию преподавателя.

5.3.2 Включить измерительный блок в сеть, записать силу тока в цепи сегнетоэлектрика и по формуле (5.4) найти диэлектрическую проницаемость ε_1 при комнатной температуре.

5.3.3 Включить электрическую печь в сеть и при нагреве через каждые 10 °С снимать показания микроамперметра. Результаты измерений занести в таблицу 5.1. При достижении температуры 130 °С прекратить измерения, выключить установку и открыть дверцу печи для охлаждения образца. *Во избежание ожогов прикасаться к нагретым внутри печи частям запрещается!*

Таблица 5.1 – Результаты измерений и вычислений

$t, ^\circ\text{C}$	$I, \text{мкА}$	ε	$\varepsilon/\varepsilon_1$

5.3.4 Для всех измеренных значений силы тока I по формуле (5.4) рассчитать значения ε . Результаты вычислений занести в таблицу 5.1.

5.3.5 По полученным результатам построить график зависимости $\varepsilon / \varepsilon_1 = f(t^\circ)$ и сделать вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое поляризация диэлектриков?
- 2 Какие вещества называются сегнетоэлектриками?
- 3 Охарактеризуйте основные свойства сегнетоэлектриков, отличающие их от обычных диэлектриков.
- 4 Почему свойства сегнетоэлектриков так существенно отличаются от свойств обычных диэлектриков?
- 5 Где и каким образом применяются сегнетоэлектрики?
- 6 Опишите принцип действия и устройство лабораторной установки.

6 Лабораторная работа № 6. Изучение обобщенного закона Ома в интегральной форме для постоянного тока

Цель работы: изучить закон Ома в интегральной форме, и экспериментально определить ЭДС и внутреннее сопротивление гальванического элемента.

6.1 Общие сведения

Если в проводнике действует только *электростатическое поле*, то в нем может возникнуть только *кратковременный электрический ток*. Действительно, если обкладки конденсатора, заряженного до некоторой разности потенциалов $\Delta\phi$, соединить проводником, то по мере протекания тока конденсатор будет разряжаться, и с течением времени потенциал во всех точках системы уравнивается и ток прекратится.

Для поддержания электрического тока достаточно длительное время, необходим источник энергии, в котором за счет сил *не электростатического происхождения* осуществлялся бы перенос носителей тока в исходную точку с большим потенциалом. Указанные силы называются *сторонними*.

Сторонние силы могут быть химической, электромагнитной природы и др. Например, в большинстве аккумуляторов роль сторонних сил играют силы химического взаимодействия, приводящие к разделению молекул электролитов на разноименные заряды. В этом случае разность потенциалов на электродах аккумулятора поддерживается за счет энергии химической реакции. Основными характеристиками такого источника тока, является его электродвижущая сила (ЭДС) и внутреннее сопротивление.

Электродвижущей силой называют физическую величину ε , численно равную работе сторонних (не потенциальных) сил по перемещению положительного единичного заряда на рассматриваемом участке цепи.

Однородным участком цепи называется такой участок, который не содержит источник ЭДС.

Неоднородный участок цепи содержит источник ЭДС.

На рисунке 6.1 показан неоднородный участок цепи, на котором электрический ток I поддерживается и разностью потенциалов $(\varphi_1 - \varphi_2)$, и электродвижущей силой ε

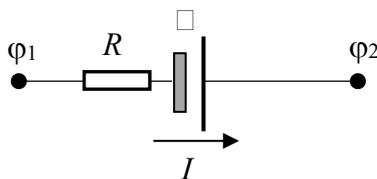


Рисунок 6.1 – Неоднородный участок электрической цепи

Математическое выражение *закона Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме* записывается в виде

$$IR_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon_{12}, \quad (6.1)$$

где R_{12} – электрическое сопротивление участка, которое содержит как внешнее R , относительно источника, так и внутреннее r сопротивления, $R_{12} = R + r$.

ЭДС так же, как и сила тока, является алгебраической величиной, поэтому следует учитывать ее знак.

Если ЭДС *способствует* перемещению положительных зарядов в данном направлении, то она считается *положительной*. Если ЭДС *препятствует* перемещению положительных зарядов в данном направлении, то она считается *отрицательной*.

Произведение сопротивления R_{12} участка цепи и силы тока I в нем называется напряжением. Из формулы (6.1) следует физический смысл напряжения: *напряжением на участке цепи называется физическая величина, численно рав-*

ная алгебраической сумме работ электростатических и сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль этого участка.

Формула (6.1) называется также формулой обобщенного закона Ома, так как она справедлива для различных цепей.

Если на рисунке 6.1 концы участка замкнуть проводником, то получим неразветвленную замкнутую цепь (рисунок 6.2).

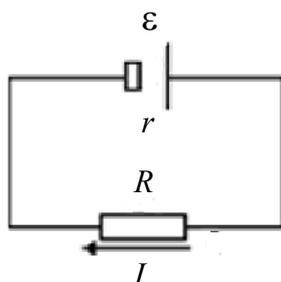


Рисунок 6.2 – Неразветвленная замкнутая цепь

В этом случае $\varphi_1 = \varphi_2$ и из формулы (6.1) получим закон Ома в следующем виде

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (6.2)$$

В случае неразветвленной замкнутой цепи ЭДС равна работе по перемещению единичного положительного заряда по всей цепи.

Из формулы (6.2) следует

$$\varepsilon = IR + Ir, \quad (6.3)$$

где IR – напряжение на внешнем участке цепи (на нагрузке);

Ir – напряжение на внутреннем участке цепи (между электродами).

При подключении к клеммам источника тока вольтметра его сопротивление является нагрузкой для источника тока. Поэтому вольтметр покажет не ЭДС источника, а напряжение U_B на внутреннем сопротивлении вольтметра

$$IR_B = \varepsilon - Ir. \quad (6.4)$$

Из формулы (6.4) следует, что напряжение U_B , измеряемое вольтметром, может быть равно ЭДС только в том случае, если $r = 0$ или $I = 0$. Так как внутреннее сопротивление источника тока всегда отлично от нуля ($r \neq 0$), то в момент измерения ЭДС ток через элемент должен быть равен нулю. Однако в этом случае и вольтметр ничего не покажет. Поэтому ЭДС источников тока измеряют, как правило, методом компенсации, когда $I = 0$.

В случае *однородного* участка цепи (рисунок 6.3) с током I , $\varepsilon = 0$, $r = 0$ формула (6.1) принимает следующий вид:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad \text{или} \quad I = \frac{U}{R}. \quad (6.5)$$

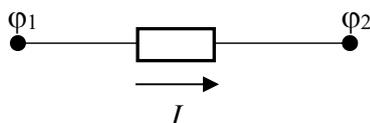


Рисунок 6.3 – Однородный участок цепи

6.2 Описание лабораторной установки и метода измерений

Электрическая схема установки показана на рисунке 6.4.

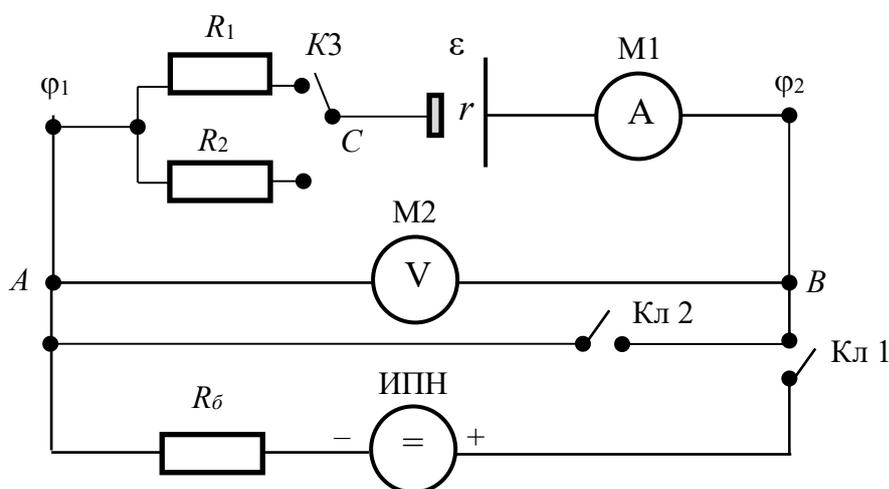


Рисунок 6.4 – Электрическая схема лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из неоднородного участка цепи, который содержит сопротивления нагрузки R_1 , R_2 и источник ЭДС с внутренним сопротивлением r . Сила тока на рассматриваемом участке измеряется мультиметром М1. Разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) создается внешним источником постоянного напряжения ИПН. Коммутация цепи осуществляется ключами КЛ1, КЛ2 и коммутатором КЗ.

Так как участок $A-B$ не содержит исследуемый источник, то $\varepsilon = 0$, $r = 0$ и формула (6.1) принимает следующий вид:

$$IR_B = U_B = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (6.6)$$

Из формулы (6.6) следует, что напряжение на вольтметре М2 равно разности потенциалов на изучаемом неоднородном участке цепи, то есть вольтметр показывает разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$).

Преобразуем формулу (6.1) с учетом (6.6) к следующему виду:

$$I = \frac{U_B}{R_{12} + r} \pm \frac{\varepsilon_{12}}{R_{12} + r}. \quad (6.7)$$

В формуле (6.7) величины U_B и ε могут иметь как одинаковые, так и противоположные знаки. Измерения предпочтительно проводить при условии, когда $(\varphi_1 - \varphi_2)$ и ε имеют разные знаки и $|(\varphi_1 - \varphi_2)| > |\varepsilon|$. При постоянных значениях величин R_{12} , r и ε_{12} формула (6.7) дает прямо пропорциональную зависимость силы тока от разности потенциалов U_B на участке. Второй член правой части определяет положение графика относительно оси тока I .

На рисунке 6.5 показан пример графика, когда «плюс» внешнего источника ИПН подключен к «плюсу» источника ЭДС (зарядка аккумулятора).

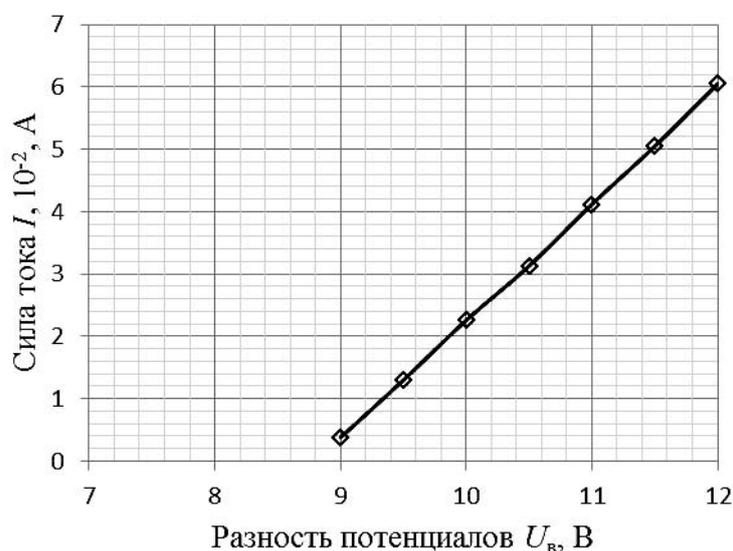


Рисунок 6.5 – График зависимости силы тока от разности потенциалов на участке

Тангенс угла наклона графика к оси U_B равен коэффициенту пропорциональности $1/(R_{12} + r_{12})$,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I}{\Delta U_B} = \frac{1}{R_{12} + r}. \quad (6.8)$$

По вычисленному значению $\operatorname{tg} \alpha$ и известному значению R_{12} можно по формуле (6.8) определить внутреннее сопротивление исследуемого источника. Затем, выбрав любую пару значений I и U_B , по формуле (6.7) определить ЭДС. Также ЭДС можно определить графически, продлив полученный график до пересечения с осью U_B . Точка пересечения будет соответствовать значению ε .

Таким образом, экспериментальная часть работы по определению внутреннего сопротивления и ЭДС исследуемого источника сводится к измерению

значения силы тока на неоднородном участке цепи при различных значениях разности потенциалов и построению вольт-амперной характеристики.

Если при замкнутом ключе Кл1 дополнительно замкнуть ключ Кл2, то разность потенциалов на исследуемом участке цепи будет равна нулю и получим замкнутую неразветвленную цепь, которая описывается формулой (6.2). Для изучения такой цепи вольтметр следует подключить между точками В–С, то есть к сопротивлению нагрузки R_1 или R_2 . Поочередно включая R_1 и R_2 и измеряя соответствующие им значения U_1, I_1 и U_2, I_2 можно определить ЭДС источника по формуле

$$\varepsilon = (R_2 - R_1) \frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2}. \quad (6.9)$$

6.3 Программа работы

6.3.1 Изучение обобщенного закона Ома.

1 Электрическая цепь по схеме рисунка 6.4 дается собранной.

Убедиться, что исследуемый элемент и внешний источник соединены одноимёнными полюсами. Ключи Кл1, Кл2 и коммутатор К3 должны быть отключены. *До проверки схемы лаборантом или преподавателем установку не включать!*

2 На источнике ИПН регулировочную ручку поставить в крайнее левое положение. На амперметре М1 установить предел измерения 200 мА для постоянного тока, а на вольтметре М2 предел измерения 20 В. Подключить вольтметр М2 к точкам А–В.

3 Подключить исследуемый источник в цепь. Включить источник ИПН. Коммутатором К3 подключить сопротивление R_1 и замкнуть ключ Кл1.

4 Вращая регулировочную рукоятку источника ИПН, по индикатору вольтметра М2 установить $U_B = 15$ В и дождаться установления постоянного значения тока на амперметре М1.

5 Уменьшая разность потенциалов от 15 до 10 В с шагом 1 В, для каждого значения U_B измерить силу тока по амперметру М1. Результаты измерения занести в таблицу 6.1.

6 Установить $U_B = 15$ В по индикатору вольтметра М2. Коммутатором К3 подключить сопротивление R_2 , и дождаться установления постоянного значения силы тока на амперметре М1. Затем п. 5 повторить для сопротивления R_2 .

7 По данным таблицы 6.1 построить вольт-амперные характеристики исследуемого участка цепи в одной системе координат I и U_B .

8 По формуле (6.8) определить тангенсы углов наклона прямых и вычислить значения внутреннего сопротивления r_1 и r_2 . Вычислить среднее значение.

Значения сопротивлений R_1 и R_2 указаны на лабораторном стенде.

9 Выбрать из таблицы 6.1 любую пару значений I и U_B при R_1 и R_2 и по формуле (6.7) определить ε_1 и ε_2 . Вычислить среднее арифметическое значение $\langle \varepsilon \rangle$.

10 На графике, полученном в п. 7, продлить экспериментальные прямые до пересечения с осью U_B и по точке пересечения определить $\varepsilon_{гр}$.

Все полученные значения занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты измерений и вычислений

R , Ом	U_B , В	I , А	$\text{tg}\alpha$	r_i , Ом	$\langle r \rangle$, Ом	ε_i , В	$\langle \varepsilon \rangle$, В	$\varepsilon_{гр}$, В	U_i , В	I_i , А	$\varepsilon_{замк}$, В
R_1											
R_2											

6.3.2 Закон Ома для неразветвленной замкнутой цепи.

1 При замкнутом ключе Кл1 дополнительно замкнуть ключ Кл2. По показанию вольтметра М2 убедиться, что $U_B = 0$, т. е. разность потенциалов на участке $A-B$ равна нулю.

2 Вольтметр М2 подключить к точкам $B-C$.

3 Коммутатором КЗ выбрать сопротивление R_1 и измерить напряжение U_1 и силу тока I_1 .

4 Повторить п. 3 для сопротивления R_2 , измерив значения U_2 и I_2 .

Значения U_1 , I_1 и U_2 , I_2 занести в таблицу 6.1.

5 По формуле (6.9) вычислить значение $\varepsilon_{замк}$ и сравнить его с $\langle \varepsilon \rangle$ и $\varepsilon_{гр}$.

6 Результат анализа значений $\varepsilon_{замк}$, $\langle \varepsilon \rangle$ и $\varepsilon_{гр}$ отразить в выводе.

Контрольные вопросы

1 Какова природа сторонних сил в источниках тока?

2 Можно ли измерить ЭДС с помощью вольтметра?

3 Записать и пояснить закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме.

4 Пояснить, как в работе определяются внутреннее сопротивление и ЭДС.

5 Можно ли измерить ЭДС, если изменить полярность его подключения?

6 Можно ли определить ЭДС, если $\varepsilon > (\varphi_1 - \varphi_2)$?

Список литературы

- 1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики: учебное пособие для втузов / Т. И. Трофимова. – Москва: Высшая школа, 2017. – 560 с.
- 2 **Савельев, И. В.** Курс общей физики: учебное пособие в 3 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 15-е изд., стер. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2019. – 500 с.
- 3 **Детлаф, А. А.** Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва: Высшая школа, 2001. – 718 с.
- 4 **Майсова, Н. М.** Практикум по курсу общей физики / Н. М. Майсова. – Москва: Высшая школа, 1970. – 328 с.